

# 液晶の構造とトライボロジー特性

森 誠之\*<sup>1</sup>/七尾英孝\*<sup>2</sup>/南 一郎\*<sup>3</sup>

潤滑により摩擦・摩耗を適切に制御する科学技術をトライボロジーと呼んでいる。ここでは、液晶を潤滑剤としたときの流体潤滑ならびに境界潤滑特性について述べた。特に、液晶の分子構造と潤滑特性の関係、およびせん断による液晶の分子配向の影響について検討した。また、潤滑油と液晶混合物の潤滑特性や液晶を用いた電場による摩擦制御などの応用についても述べた。

キーワード：液晶，弾性流体潤滑，境界潤滑，分子配向，摩擦制御

## 1. はじめに 効率化技術としてのトライボロジー

トライボロジーは、摩擦・摩耗を制御する潤滑に関する科学と技術の分野である。摩擦を減らすことにより省エネルギーに寄与し、摩耗を減らすことにより機械部品や装置の寿命が延びるため省資源に貢献できる。トライボロジー技術の進歩により効率化が実現し、これは環境負荷低減にも役立つ<sup>1)</sup>。一方、自動車のトランスミッションでは高い摩擦を利用して動力を伝達し、研磨など機械的な加工では摩耗の促進が求められる。すなわち、トライボロジーは摩擦・摩耗の制御を目的としている。近年、トライボロジーに求められているのは、より過酷な条件あるいはより精密な環境でのより信頼性の高い潤滑技術である。例えば、ハードディスクのヘッドとディスクの界面(HDI)では、ナノメートルスケールの潤滑膜がハードディスクの信頼性と寿命を保証している<sup>2)</sup>。

より厳しい潤滑条件での潤滑の目的を達成するために、新しい潤滑剤の成分として新規な物質が日々検討されている。例えば、特異な物性を持つイオン液体が注目されているが、これを潤滑剤として用いる試みが検討されている<sup>3)</sup>。液晶は常温付近で特異な構造を持ち、電場や磁場環

境下で物性の異方性を示すことから、積極的に潤滑特性を制御する立場から注目される物質である。液晶のトライボロジー特性<sup>4)~7)</sup>、および電気粘性流体<sup>8),9)</sup>については本誌をはじめすでに複数の解説が掲載されているので、できるだけ重複を避け、化学の立場から主としてサーモトロピック液晶のトライボロジー特性について解説したい。

## 2. 潤滑機構と潤滑剤

潤滑状態は、流体潤滑と境界潤滑に大別できる(図-1)。ボールベアリングのように点接触部に応力が集中すると、金属材料が弾性変形し、直径 200  $\mu\text{m}$  程度で接触する。このため接触部の圧力は 1 GPa(約 1 万気圧)を超える。このような潤滑を弾性流体潤滑 Elasto-hydrodynamic Lubrication : EHL と呼んでいる。ボールが適当な速度で回転し潤滑油が十分な粘度を持てば、二つの固体間には潤滑油膜が形成される。油膜により固体接触が防がれるので、摩擦・摩耗が少なく理想的な潤滑状態と言える。流体の粘度  $\eta$  は一般に常圧粘度  $\eta_0$  に対し圧力  $P$  の上昇とともに指数関数的に増加し(式(1))、その係数である粘度圧力係数  $\alpha$

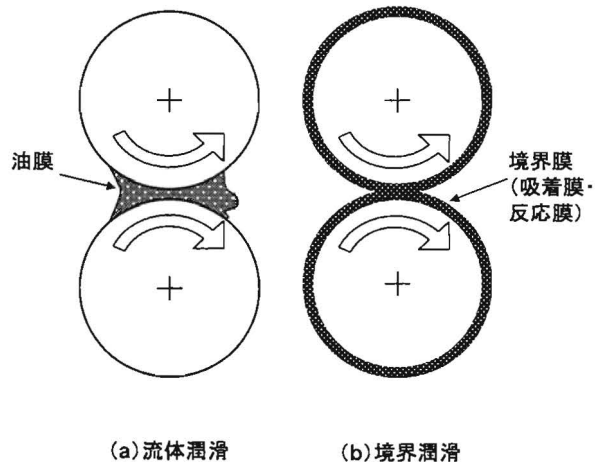


図-1 潤滑モードのモデル

\* Shigeyuki MORI  
岩手大学工学部・教授  
岩手県盛岡市上田 4-3-5(〒020-8551)  
E-mail : mori@iwate-u.ac.jp  
\* Hidetaka NANAŌ  
岩手大学工学部・助手  
岩手県盛岡市上田 4-3-5(〒020-8551)  
E-mail : nanao@iwate-u.ac.jp  
\* Ichiro MINAMI  
岩手大学工学部・助教授  
岩手県盛岡市上田 4-3-5(〒020-8551)  
E-mail : ichiro@iwate-u.ac.jp  
2006.11.25 受理

は流体の分子構造に依存している。一方、Eyring の粘度式によれば、粘度の圧力係数は活性化体積  $\Delta V^\ddagger$  であり (式 (2)), セグメントフローを考慮すれば、柔軟な分子構造を持つパラフィン油は活性化体積および粘度圧力係数は小さいが、側鎖を持つポリブテンはいずれも大きな値を有する (表-1)。式 (3) に示すように、油膜厚さ  $h$  は粘度圧力係数  $\alpha$  に依存することから、側鎖を持つポリブテンは  $\alpha$  が大きいので油膜をつくりやすいが、粘度上昇によりトラクション力 (EHL における摩擦力) も大きくなる (式 (4))。すなわち、一つの流体では厚い油膜と低い摩擦係数を同時に実現することができない。ところが、液晶ではこれを実現できる興味ある結果が得られており、これは後述する。

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha P) \quad (1)$$

$$\eta = a \exp\left(\frac{\Delta E^\ddagger}{RT}\right) \exp\left(\frac{-\Delta S^\ddagger}{R}\right) \exp\left(\frac{P\Delta V^\ddagger}{RT}\right) \quad (2)$$

$$h = b\alpha^{0.54} \quad (3)$$

$$F = c\eta U/h$$

(せん断速度  $S$  = 滑り速度  $U$  / 油膜厚さ  $h$ ) (4)

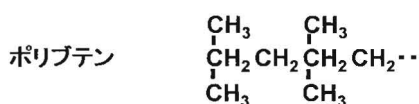
これらの式で  $a, b, c$  はそれぞれ定数あるいは他の因子の関数である。

摩擦速度が遅くなったり、潤滑油の粘度が低いと油膜が十分形成されず、固体接触が起こる。このような状態を境界潤滑と呼び、固体表面を機械的接触から保護しなければならない。一般に、吸着する成分や材料表面と反応する成分を潤滑油中に添加して表面に潤滑性の皮膜 (境界膜) を形成している (図-1b)。

このように、潤滑油成分に求められる特性は、適度な粘度と吸着および反応性である。したがって、液晶を潤滑剤として用いる場合、液晶の粘度特性および材料表面との化学的な相互作用が重要な因子となる。

表-1 合成潤滑油の分子構造と粘度特性

潤滑油の性質	ポリ $\alpha$ オレフィン	ポリブテン
分子構造の特徴	柔軟	剛直
平均分子量	1500	665
常圧粘度	470	570
粘度圧力係数	18	30
トラクション係数	0.05	0.1



### 3. 粘度特性

粘度は潤滑油が持つべき基本的特性であり、液晶の粘度の電場、およびせん断速度との関係を見たのが図-2である<sup>10)</sup>。電場の上昇とともに粘度も上昇し、一定の電場を越えると粘度は飽和に達することは多くの実験例が示している。同じ電場例えば 1 kV/mm で比較すると、せん断速度 (= 滑り速度  $U$  / 油膜厚さ  $h$ ) が上昇すると粘度は低下する。粘度を最大値にするために必要な電場は、せん断速度とともに上昇する。すなわち、電場により分子がせん断方向に垂直に配向するため粘度が上昇する。一方、せん断による力学場の中で分子はせん断方向に平行に配向するため粘度が低下すると説明されている。すなわち、液晶分子は「電場」とせん断という「力学場」のせめぎ合いの中で分子配向し、粘度が決まると考えられる。この図で与えているせん断速度はせいぜい数百  $s^{-1}$  程度であるが、一般のベアリングではせん断速度が  $10^4 \sim 10^6 s^{-1}$  にも達するので、液晶分子はせん断による影響を強く受けることになる。言い換えれば、実用的ベアリングに液晶を用いて摩擦を制御するためにはさらに高い電場が必要であり、そのような電場では絶縁破壊を起こすため利用できない。すなわち、液晶を電気粘性流体として利用するには、比較的せん断速度が低い条件に限られる<sup>8),9)</sup>。

一方、液晶は潤滑というせん断場に置かれると分子配向し、摩擦抵抗が低下する。これはせん断という力学場において分子配向するため粘度が低下するためである。詳細は以下に述べる。

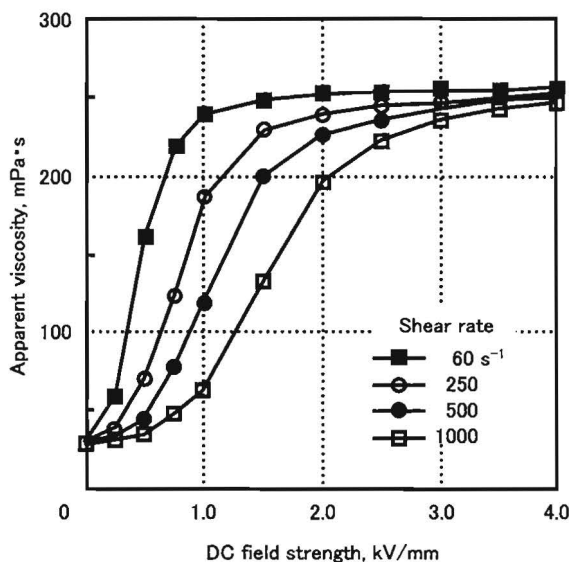


図-2 シアノフェニルシクロヘキサン系液晶の各せん断速度における粘度と電場強度の関係

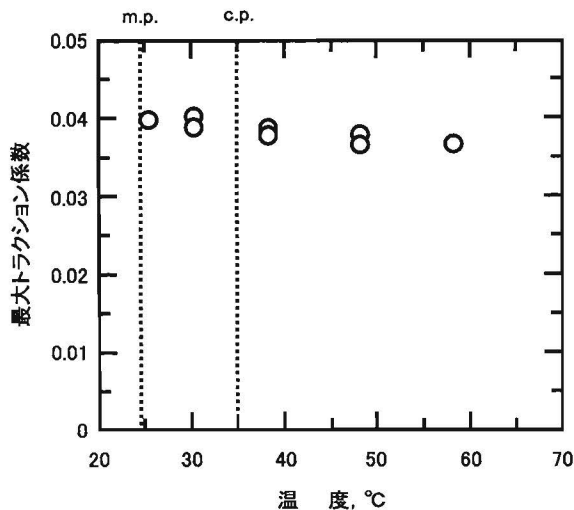


図-3 液晶の EHL 潤滑性と温度の関係

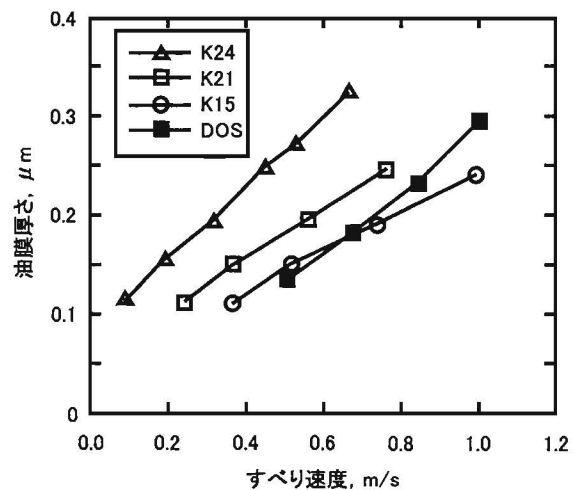


図-4 EHL 条件下における液晶の油膜形成能力

## 4. 潤滑特性

### 4.1 弾性流体潤滑

液晶の弾性流体潤滑特性を、二円筒転がり滑り試験機で検討したのが図-3である。荷重は735 N、ディスクの回転数は220 rpmである。このような厳しい条件においても、一般的な合成潤滑油に比べて液晶は低いトラクション係数(=EHLにおける摩擦係数)を示した<sup>11)</sup>。ポリアルフアオレフィン PAO は直線的で柔軟な分子構造を持つため、合成潤滑油の中では比較的低いトラクション係数(0.05)を示す(表-1)。しかし、液晶はPAOよりも低いトラクション係数(0.04)を示した(図-3)。次に、潤滑油の油膜形成能力を知るために、光干渉法により EHL 油膜の厚さを測定した。図-4に示すように、液晶(K 24)はエステル系合成潤滑油(DOS:セバチン酸ジオクチル)に比べて厚い油膜を形成することがわかる。第2節で述べたように、油膜厚さは圧力粘度係数 $\alpha$ に依存するが、 $\alpha$ が大きいとせん断抵抗すなわち摩擦係数も大きくなる。すなわち、一般の流体では厚い油膜と低摩擦係数は両立しないことになる。しかし、液晶でこれが実現したことは、せん断場における液晶分子の配向性に基づくものと考えられる。また、数 kV の電圧印加時には、弾性流体潤滑の油膜が4倍ほど厚くなることが示されている<sup>12)</sup>。

液晶の弾性流体潤滑性に対する温度の影響を調べると、図-3のようにネマティック相から透明点(c.p.)を越え、等方性液体状態に移っても摩擦係数はほぼ一定であり<sup>11)</sup>、ネマティック相が維持されていなくても潤滑性がよいことがわかる。すなわち、熱的に安定な液晶状態が必要なのではなく、せん断場において分子配向しやすい分子構造が低トラクション係数に関与したと言える。

弾性流体潤滑下でのトラクション係数は、液晶の分子構

造に密接に関係している(図-5)<sup>11)</sup>。シアノ基を有するネマティック相の液晶は、図-5に示すように剛直なシアノフェニル基と柔軟なアルキル鎖からできている。柔軟構造のアルキル鎖長を伸ばすと粘度も上昇するが、トラクション係数には影響しなかった。しかし、剛直部に平面構造のシアノビフェニル基を持つ液晶(CB)は、他の剛直構造を持つ液晶(CPC, ECB)よりも低いトラクション係数を示した。一般の潤滑油の場合、アルキル鎖の炭素数が増えれば粘度が上昇し、弾性流体潤滑下でのトラクション係数も上昇する。したがって液晶の場合、せん断場において特異な構造をつくることにより、トラクション係数がアルキル

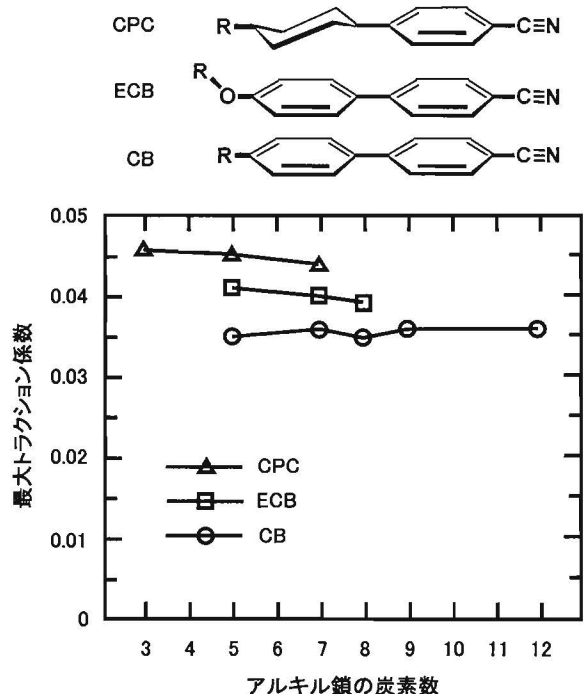


図-5 シアノフェニル系液晶の分子構造と潤滑性

鎖に依存しなかったものと考えられる。トラクション係数が液晶分子の剛直構造部に依存していることから、せん断場における分子配向に剛直部が関与したことを示している。すなわち、ビフェニルの平面構造がせん断場で配向し、低トラクション係数に関与したのと考えられる。

液晶を潤滑油添加剤として、一般の潤滑油基油に溶解した場合、図-5 でみたような液晶特有の低トラクション係数は得られなかった。すなわち、液晶が基油に溶解し液晶分子が離散した状態では低トラクション係数は得られず、液晶が示した優れた EHL 潤滑性は、液晶がせん断場で示す集団としての性質がかかわっているものと考えられる。そこで、液晶が溶解しない基油に分散させて用いたところ、図-6 の結果を得た<sup>7)</sup>。20%程度の液晶を基油に分散すれば、液晶単独の場合と同じ程度の潤滑性を得ることができた。これは、図-7 に示すように、分散していた液晶が二円筒の接触部で分離・濃縮し、この液晶相が流体潤滑作用に関与したのと考えられる。

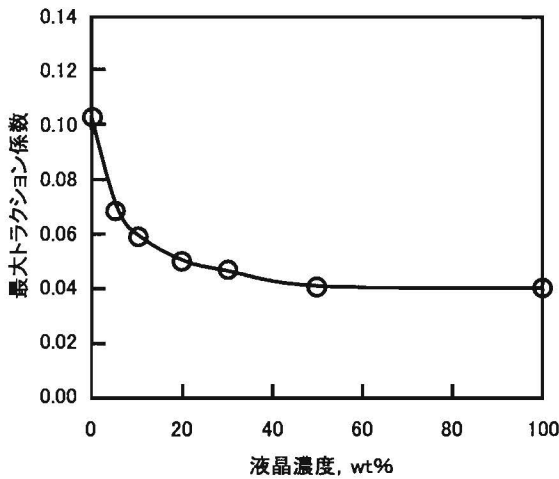


図-6 液晶を分散した潤滑剤の EHL 潤滑性

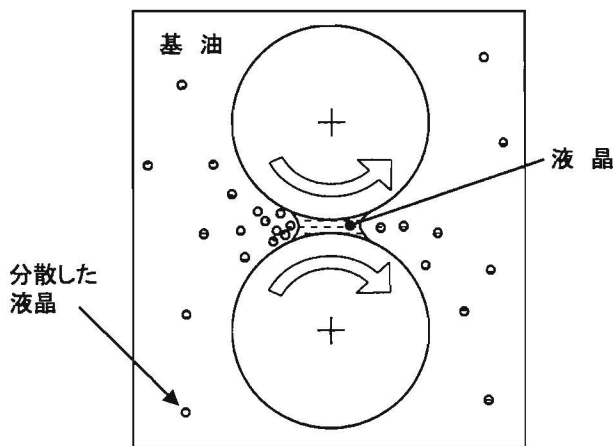


図-7 液晶分散系の潤滑作用メカニズム

## 4.2 境界潤滑

固体接触する条件下での潤滑、すなわち境界潤滑条件下でも液晶が使われている。境界潤滑では、吸着膜や反応膜など表面を保護する境界膜により潤滑が行われる。図-8 は振り子試験機で測定したディスプレイ用液晶の摩擦係数である<sup>9)</sup>。長鎖脂肪酸を添加剤とした潤滑油を振り子試験機で評価すると、摩擦係数は 0.1 以下になり脂肪酸の吸着層が潤滑効果を示すと考えられている。この液晶添加油の場合、長鎖脂肪酸ほどの摩擦低減効果は得られていないことから、吸着層の潤滑効果は大きくない。ネマティック相では温度の上昇とともに摩擦係数が上昇しているが、等方性液体になっても摩擦係数が激変するわけではなく連続的に変化しており、ここでも熱的に安定な液晶相が関与しているわけではないことを示している。一方、この潤滑試験では滑り合う二面間に電場を印加することにより摩擦係数が低下しており<sup>8)</sup>、電場によって接触界面に何らかの構造ができたものと思われるが、その詳細は明らかでない。

さらに厳しい条件下で、液晶を添加した潤滑油の潤滑特性を評価している<sup>13)</sup>。ここで用いた四球試験機は、3個のボールを固定し上部に乗せた1個のボールを高荷重、高速回転の条件下で耐摩耗性を評価する(図-9)。一般に、このような厳しい条件下で利用できる潤滑油には添加剤として、S や P, Mo, Zn を含む化合物が用いられており、添加剤が摩擦面で反応して硫化物やリン酸塩を生成し摩擦面に境界膜を形成する。ここで用いた潤滑油は基油の炭化水素油(ヘキサデカン)に、液晶 5 CB を 1~5% 添加したものである。荷重 200 および 300 N, 回転数 1450 rpm で試験したところ、液晶をわずか 1% 添加するだけで摩擦係数が低下し(図-10)、摩耗も抑制された<sup>13)</sup>。さらに、耐荷重も液晶の添加濃度とともに 250 N から 350 N に増加し

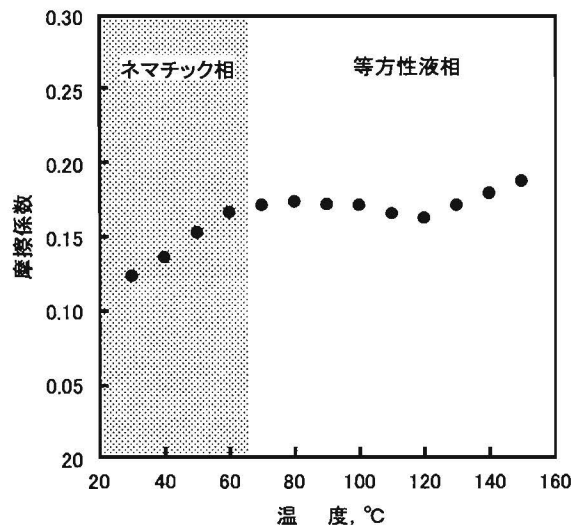


図-8 5 CB の境界潤滑性(振り子試験機)

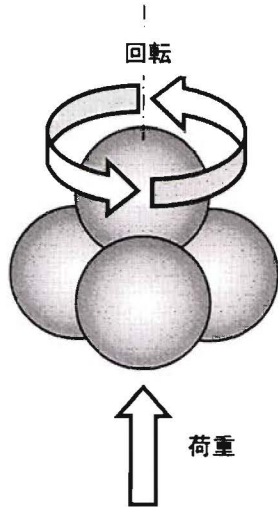


図-9 四球摩耗試験機概略図

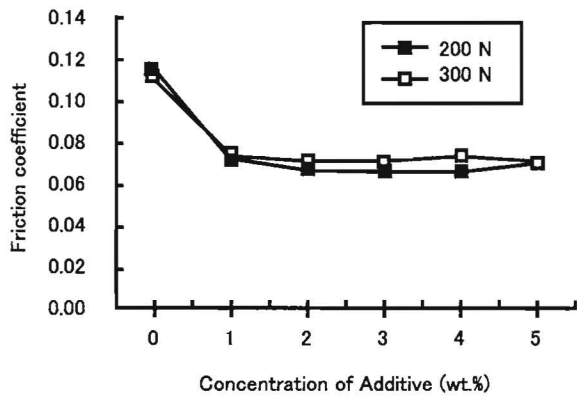


図-10 5 CB を溶解した潤滑油の境界潤滑性

た。炭化水素の基油は吸着や反応する官能基を有しないことから、摩擦係数の低下および摩耗痕サイズの低下は、添加剤としての5 CBが潤滑性を発揮したものとされている。さらに、摩擦試験後のボールを石油エーテルで洗浄後、顕微FTIRで分析したところ、シアノ基やベンゼン環の吸収が検出されたことから、筆者らは液晶が反応したのではなく、液晶分子のまま吸着し潤滑性を発揮したとしている。摩擦面での液晶のかかわりについてはさらに検討が必要であるが、5 CBが添加剤としての境界潤滑効果を持つことを示している。しかし、流体潤滑における液晶の摩擦低減効果に比べると、液晶の境界潤滑特性は十分なものではない。

## 5. 分子配向

電場の印加により液晶の粘度が上昇する電気粘性効果<sup>9),10)</sup>や、弾性流体潤滑条件下でせん断により得られた低トラクション係数は、液晶分子の配向に基づくと考えられている。分子の配向については、以下のように分光学的な手法を用いることにより確認できる。

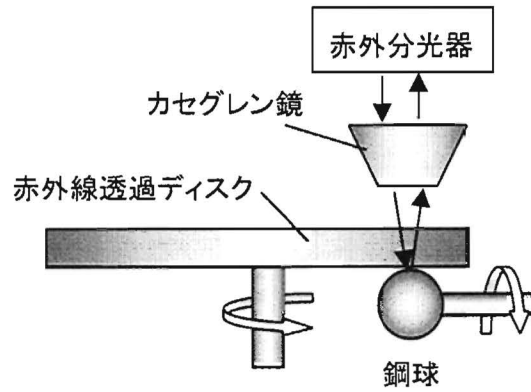


図-11 顕微FTIRによるEHL油膜のその場観察

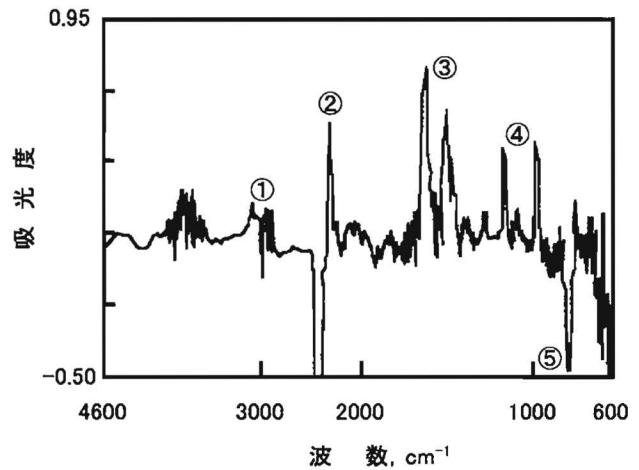


図-12 FTIRスペクトルによるヘルツ接触域内における液晶の分子配向の観察  
差スペクトル=潤滑中のスペクトル-静的スペクトル

弾性流体潤滑条件下におけるヘルツ接触域を顕微FTIRで観察する手法がある<sup>14)</sup>。ディスクとボール間でEHL潤滑をし、顕微鏡でヘルツ接触部を観察する。ディスクは赤外光が透過するようにダイヤモンド、サファイアあるいはフッ化カルシウムで作られており、赤外分光はアパーチャーサイズ25ミクロン程度でサンプリングできる(図-11)。静的条件下で測定したスペクトルとせん断条件下で測定したスペクトルの差を図-12に示す<sup>11)</sup>。ここで、アルキル鎖のCH伸縮振動①は、せん断により吸光度が変わらないと仮定して差が小さくなるように調整した。赤外光はせん断面にほぼ垂直に入射することから、赤外光の電場ベクトルはせん断面に平行になる。すなわち、せん断面に平行な振動を持つ吸収が起こりやすいことになる。せん断により、明らかにシアノ基②とベンゼン環③④の面内伸縮振動の強度が増加している。これに対して、ベンゼン環のCH面外変角振動⑤の強度が低下したことから、5 CBの剛直構造であるシアノビフェニル基がせん断面に配向したことを示している。すなわち、液晶がせん断面に

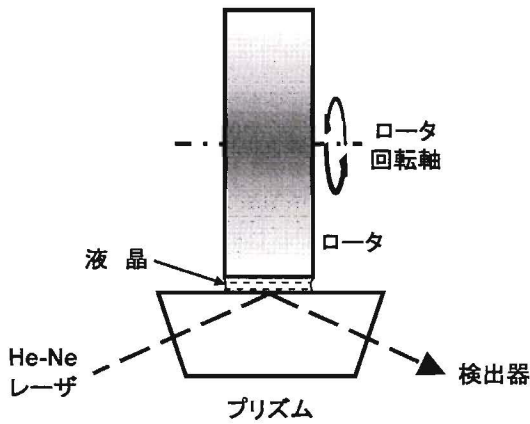


図-13 全反射エリプソメータに組み込んだ潤滑試験機のせん断場概略図

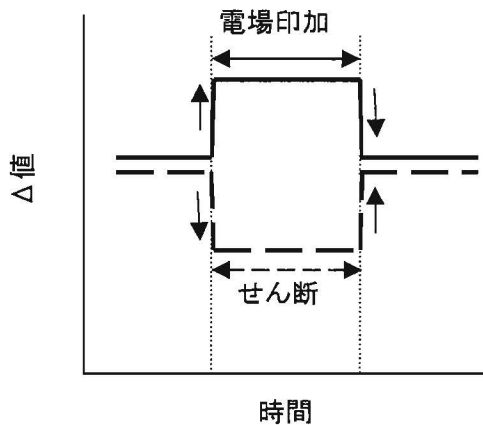


図-14 全反射エリプソメータにより観察した液晶分子の配向

において分子配向することは明らかである。

全反射エリプソメータを用いた測定でも、液晶分子の配向を知ることができる<sup>15)</sup>。電場を印加すると光学パラメータである  $\Delta$  値が階段状に反応して変化する。 $\Delta$  値の電場応答性から、液晶の電場に対する配向性が検討されている<sup>16)</sup>。この手法をせん断場に応用すれば、せん断場における配向性が検討できる。全反射用プリズムと回転するロータの間に液晶を挟み、ロータを高速で回転することにより液晶にせん断をかけた(図-13)。その結果、図-14に示すようにせん断によって  $\Delta$  値が階段状に変化した<sup>17)</sup>。しかし、変化の方向は電場を印加したときとは逆になっている。すなわち、電場によって液晶分子は電極面に垂直方向に配向すると考えれば、せん断によって液晶分子はせん断面に平行に配向した状態を観察できた。せん断開始とせん断停止時に  $\Delta$  値が応答よく変化していることから、せん断に対する分子の応答性は非常によいと言える。

せん断による液晶分子の応答性を検討するために、時間分解赤外分光法を利用してその挙動を観察した<sup>18)</sup>。赤外透過窓である KBr の板に液晶を挟み、一方の KBr 板を振動

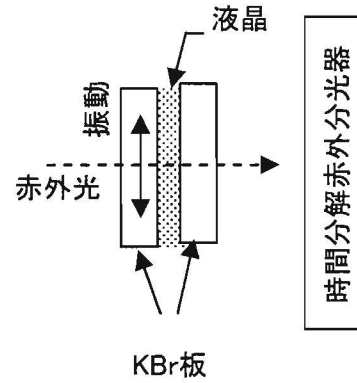


図-15 振動せん断場における液晶分子の追従性観察

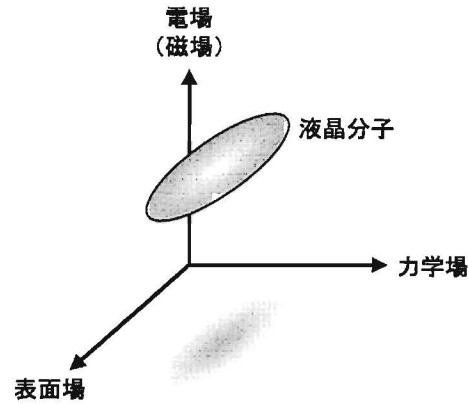


図-16 場の中での液晶分子の挙動

させることにより、液晶に往復の繰り返しせん断を与えた(図-15)。透過型赤外分光法によりスペクトルを得て、液晶分子のせん断に対する応答性を検討した。分子の主軸の方向に振動を持つシアノ基の吸光度をモニターすると、往復せん断の振動数に応じてシアノ基の吸光度も周期的に変化した。すなわち、100 Hz 程度の振動せん断に対して、液晶分子は十分に応答していることがわかる。

このように、液晶分子は「電場」と同様に、せん断という「力学場」の中に置かれたときに分子配向を起こす。また、摩擦面に吸着すれば「表面場」での配向構造を持つと考えられる。すなわち、液晶分子は、電場(磁場)、力学場および表面場(吸着分子と表面の相互作用)のせめぎ合いの中で分子配向を起こし、独自の物性(例えば粘度特性)を示すと考えられる(図-16)。この中で、潤滑条件下、すなわち  $10^6 \text{s}^{-1}$  に達するせん断条件下で生じる力学場は非常に強いことに注意せねばならない。

## 6. 応 用

トライボロジーという力学場(荷重, せん断)における、摩擦・摩耗に関連する諸特性を制御するために、液晶という特異な物性を持つ物質を応用することに興味を持たれる。電気粘性流体は、電場での増粘効果を利用して、摩擦

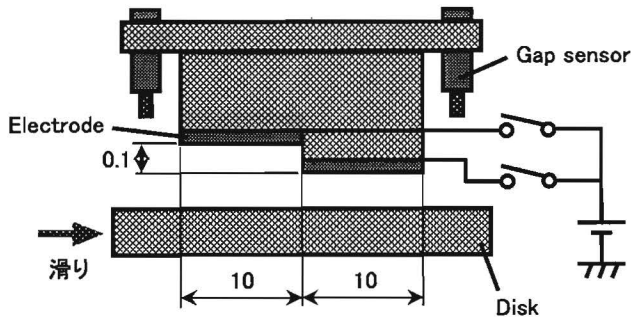


図-17 電極を取り付けたステップ軸受の概略図

を適当に制御することを目的としている<sup>8),9)</sup>。一方、前述したように弾性流体潤滑条件であれば、高せん断速度でも液晶分子のせん断配向による摩擦低減効果と油膜形成能力が利用できるであろう。この特性は液晶分子の集団構造が関与しており、添加剤のように基油に溶解した状態では効果が発揮できなかった。このような場合、分散系など液晶の集団構造が利用できる形態での応用が考えられる。これに対して、高分子液晶を希釈した溶液を用いたとき、電界中で増粘効果が得られているが、その詳細は明らかではない<sup>9)</sup>。一方、境界潤滑条件下でも摩擦低減効果や耐摩耗性あるいは耐荷重能などが観察された<sup>13)</sup>。厳しい条件下でも摩擦界面にある種の構造がつくられ、これが境界膜として作用していると思われる。しかし、その機構はまだ明らかではない。ライオトロピック液晶であるが、1000 Nを超える荷重下で、耐摩耗性および耐荷重能に優れた結果が得られている<sup>19)</sup>。液晶を分散させた高分子材料のポリアミドを鋼と摩擦したところ、二硫化モリブデンよりも耐摩耗性に優れた結果が得られている<sup>20)</sup>。基油に1 wt%程度の液晶を添加するだけで潤滑効果があるとの報告<sup>21)</sup>があるが、これは液晶としての性質よりも添加成分の極性官能基の吸着に基づくものと考えられる。また、四球摩耗試験機での評価で、ライオトロピック液晶も耐摩耗性が優れていることが報告されている<sup>22),23)</sup>。これも、液晶としての性質だけでなく、表面における構造が潤滑性を担っているものと考えられる。

液晶の電気粘性効果を利用することにより、トライボロジー特性をアクティブに制御することに大変興味を持たれる。電場印加により変動荷重条件に対して、アクティブ制御により油膜厚さを一定に保てること示されている<sup>10)</sup>。図-17に示すような階段状の表面を持つスライダとディスクの界面に液晶を挟み、電場をかけることにより変動荷重下でも油膜厚さを一定に制御した。流体の入口部、すなわちスライダの大きいほうのギャップに電場を印加することにより、外部の荷重を1.5 Nから3 Nに変動させても0.2秒以内の応答性で油膜厚さが一定(0.1 mm)に保たれることが実証された(図-18)。油膜厚さを保つことは、

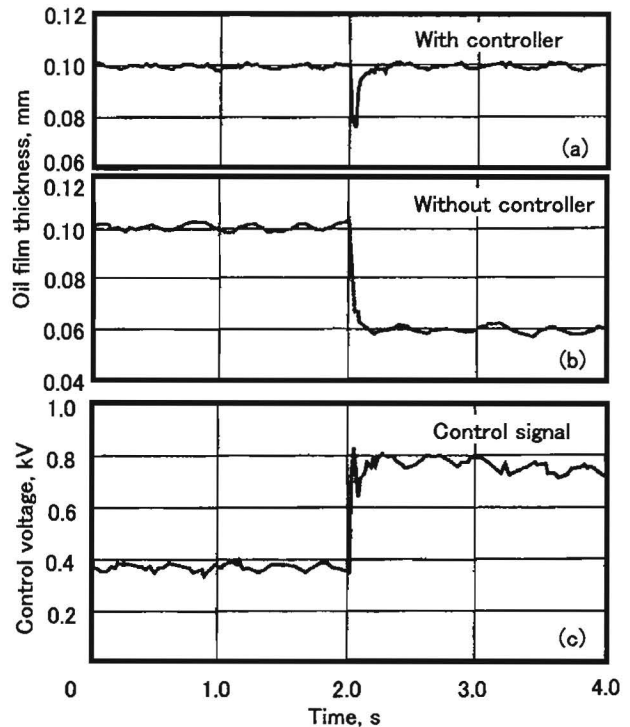


図-18 電場による油膜厚さのアクティブ制御

摩擦面の直接接触を防止するうえで重要であり、外部からのアクシデンタルな変動荷重に対してアクティブに膜厚を制御できることを示している。

## 7. ま と め

エンジンやトランスミッションのように過酷な条件での適切なトライボロジー特性を必要とする分野から、ハードディスクのようにマイクロあるいはナノスケールのトライボロジーまで、多様なトライボロジー技術を展開するために潤滑剤として新規な物質が求められている。電場(磁場)の中で特異な特性を示す液晶は、アクティブ制御を目的とする潤滑剤としての応用に興味を持たれてきた。一方、トライボロジーはせん断や固体接触という力学場の中で起こる現象であり、液晶の力学場における挙動にも興味を持たれる。電場(磁場)、力学場さらに表面場がつくる複合場の中で示す液晶分子のダイナミックな挙動がトライボロジー特性に関与しており、分子構造とトライボロジー特性の関係を明らかにしていくことが望まれる。また、液晶のトライボロジー特性を理解するには、液晶分子の構造が一次的にトライボロジー現象にかかわる場合と、液晶の分子集団が示すトライボロジー特性に分類できる。せん断という力学場での特性が明らかにされれば、トライボロジーに指向した液晶分子の設計も可能になると期待される。

## 参 考 文 献

- 1) 森 誠之：化学と教育, **50**(6), 441(2002)
- 2) 森 誠之：化学と工業, **58**(10), 1185(2005)
- 3) 森 誠之：イオン液体II(大野弘幸監修), p.277, シーエムシー出版(2006)
- 4) 中野 健：化学工業, **6**, 460(2004)
- 5) 中野 健：液晶, **6**, 137(2002)
- 6) 木村好次, 加藤隆史, 中野 健：トライボロジスト, **41**, 506(1996)
- 7) 森 誠之, 岩田英明：トライボロジスト, **41**, 500(1996)
- 8) 中野 健：トライボロジスト, **42**, 853(1997)
- 9) 福政充睦, 吉沢 篤：トライボロジスト, **41**, 494(1996)
- 10) 森下 信, 松本芳樹, 白石俊彦：トライボロジスト, **47**, 864(2002)
- 11) S. Mori and H. Iwata : *Tribology Intern.*, **29**(1), 35 (1996)
- 12) A. Korenaga, T. Yoshioka, H. Mizutani and K. Kikuchi : *Lubrication at the Frontier*, p.517, Elsevier (1999)
- 13) J. Yao, Q. Wang, Z.Xu. J. Yin and S. Wen : *Lubr. Eng.*, June, 21 (2000)
- 14) 七尾英孝, 森 誠之：トライボロジスト, **51**(8), 583(2006)
- 15) 田所利康：トライボロジスト, **51**, 450(2006)
- 16) 田所利康：応用物理, **73**(6), 759(2004)
- 17) 高橋美喜, 桂田奈緒美, 今井 潤, 森 誠之：トライボロジー会議予稿集・東京, p.265, 日本トライボロジー学会(2000)
- 18) 今井 潤, 七尾英孝, 濱口宏夫, 内田孝二, 森 誠之：トライボロジー会議予稿集・東京, p.500, 日本トライボロジー学会(1996)
- 19) C. Ma, G. Li, Q. Shen, Y. Hu, W. Liu and H. Wang : *J. Dispersion Sci. Tech.*, **20**, 1025 (1999)
- 20) M.D. Bermudez, F.J. Carrion-Vilches, I. Martinez-Mateo and G. Martinez-Nicolas : *J. Appl. Polym. Sci.*, **81**, 2426 (2001)
- 21) P. Iglesias, M.D. Bermudez, F.J. Carrion and G. Martinez-Nicolas : *Wear*, **256**, 386 (2004)
- 22) M.W. Sulek and T. Wasilewski : *Tribol. Lett.*, **18**, 197 (2005)
- 23) M.W. Sulek and T. Wasilewski : *Wear*, **260**, 193 (2006)